



Escuela
Universitaria
Ingeniería
Técnica
Industrial
ZARAGOZA

PROYECTO FINAL DE CARRERA

Evaluación de máquinas de medición por coordenadas de brazo articulado según la directriz "VDI/VDE 2617"

AUTOR

Alberto Frisa Rubio

DIRECTORES

Carlos Cajal Hernando
Jorge Santolaria Mazo

ESPECIALIDAD

Mecánica

CONVOCATORIA

Junio 2010



MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN.....	4
1.1. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	5
1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	5
1.3. ÁMBITO DEL PROYECTO.....	5
1.4. ALCANCE DEL PROYECTO.....	6
2. PLANIFICACIÓN.....	7
2.1. DURACIÓN DE LAS TAREAS.....	8
3. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO REALIZADO.....	9
3.1. VDI/VDE 2617.....	9
3.1.1. PRUEBA DE ERROR DE PALPADO.....	9
3.1.2. PRUEBA DE ERROR DE INDICACIÓN DEL TAMAÑO DE LA MEDICIÓN.....	13
3.2. TRATAMIENTO DATOS MATLAB-EXCEL.....	19
3.3. DOCUMENTACIÓN GENERADA.....	20
3.3.1. PRUEBA DE ERROR DE PALPADO.....	20
3.3.2. PRUEBA DE ERROR DE INDICACIÓN DEL TAMAÑO DE LA MEDICIÓN.....	21
3.4. CONFORMIDAD CON LAS ESPECIFICACIONES.....	28
3.5. APLICACIONES.....	29
3.5.1. PRUEBA DE ACEPTACIÓN.....	29
3.5.2. PRUEBA DE NUEVA VERIFICACIÓN.....	30
3.5.3. ANÁLISIS PROVISIONAL.....	30
4. DIFICULTADES Y DESVIACIONES RESPECTO A LA PLANIFICACIÓN.....	31
5. DEDICACIÓN.....	33
6. CONOCIMIENTOS Y HABILIDADES ADQUIRIDAS.....	34
6.1. NORMATIVAS METROLÓGICAS.....	34
6.1.1. ASME B89.4.22-2004.....	34
6.1.2. VDI/VDE 2617.....	35
6.1.3. UNE-EN ISO 10360-1.....	36
6.2. SOFTWARE.....	36
6.2.1. FARO CAM2 MEASURE.....	36
6.2.2. MATLAB (MATRIX LABORATORY).....	37
7. ASPECTOS ECONÓMICOS.....	38
8. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	39
8.1. CONCLUSIONES DEL TRABAJO REALIZADO.....	39
8.2. CONCLUSIONES PERSONALES.....	39

8.3. LÍNEAS FUTURAS.	39
9. CONSIDERACIONES FINALES.	41

1. INTRODUCCIÓN.

El proyecto que se describe a continuación ha sido realizado por Alberto Frisa Rubio en colaboración con el Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación, perteneciente al Área de Procesos de fabricación, ubicado en el Centro Politécnico Superior de la Universidad de Zaragoza, edificio Torres Quevedo. Este proyecto ha sido tutelado y supervisado por Carlos Cajal Hernando y Jorge Santolaria Mazo como directores de proyecto.

El proyecto consiste en la aplicación de la directriz “VDI/VDE 2617” respecto al brazo articulado “FARO Platinum”. Esta directriz especifica las características que sirven para describir la precisión de las máquinas de medición por coordenadas (CMMs) y describe los procedimientos para el control de estas características.

Junto con este análisis, se realiza una comparativa de esta directriz “VDI/VDE 2617” con la norma “ASME B89.4.22-2004”, cuyos objetivos son clarificar el procedimiento de evaluación de máquinas de medición por coordenadas de brazo articulado (AACMMs) y facilitar las comparaciones entre máquinas.

La norma “ASME B89.4.22-2004” pretende clarificar el procedimiento de evaluación de máquinas de medición por coordenadas de brazo articulado (AACMMs) y facilitar las comparaciones entre máquinas. Asimismo, define métodos de prueba para la mayoría de de máquinas de medición por coordenadas de brazo articulado y no pretende remplazar pruebas más completas que son requeridas para aplicaciones especiales.



Brazo articulado FARO Platinum.

Este brazo articulado del fabricante FARO, dispone de siete grados de libertad y puede abracar un volumen de trabajo de 2400 mm.

1.1. OBJETIVOS DEL PROYECTO.

El principal objetivo del presente proyecto es conocer normativas internacionales de evaluación de máquinas de medición por coordenadas de brazo articulado, para posteriormente realizar una evaluación completa con dicha normativa, un proceso que llevará un trabajo práctico y técnico.

Dichas evaluaciones se realizan mediante la directriz “VDI/VDE 2617” y la norma “ASME B89.4.22-2004”. Concretamente, el presente Proyecto Final de Carrera, se centrará en la evaluación de un brazo articulado mediante la directriz “VDI/VDE 2617”, realizando el análisis que dicha directriz menciona, ampliando a un estudio mayor en la que se estudiarán otros términos y se realizará una comparativa entre ambas normativas.

Los aspectos a comparar, serán la precisión de la máquina, el tiempo empleado, coste originado, procedimientos de verificación y aplicaciones, que resulta de la evaluación con ambos procedimientos.

1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.

La solución adoptada consistió en evaluar el brazo articulado de medición por coordenadas, según se indica en la norma “ASME B89.4.22-2004” y en la directriz “VDI/VDE 2617”. Tras la obtención de los resultados de las medidas realizadas según se indica en sendos manuales, se analizan para obtener diferentes parámetros de error de la máquina para evaluar su precisión.

1.3. ÁMBITO DEL PROYECTO.

El ámbito del presente proyecto está dirigido a la industria, y específicamente, a aquella industria que emplea este tipo de máquinas de medición por coordenadas que necesitan este tipo de controles metrológicos, como el que ha sido desarrollado.

La directriz “VDI/VDE 2617” especifica las características que sirven para describir la precisión de las máquinas de medición por coordenadas (CMMs) y describe los procedimientos para el control de estas características.

La directriz describe procedimientos para evaluar brazos articulados de medición por coordenadas por palpadores de contacto. Se puede aplicar en:

- Aceptación de pruebas que permitan verificar la conformidad de la máquina de medición por coordenadas y su palpador, con las especificaciones del fabricante.

- Pruebas de verificación adicional realizadas por el usuario para comprobaciones periódicas del brazo articulado de medición por coordenadas y su palpador.
- Comprobaciones provisionales realizadas por el usuario para la vigilancia del brazo articulado de medición por coordenadas y su palpador entre pruebas de verificación

1.4. ALCANCE DEL PROYECTO.

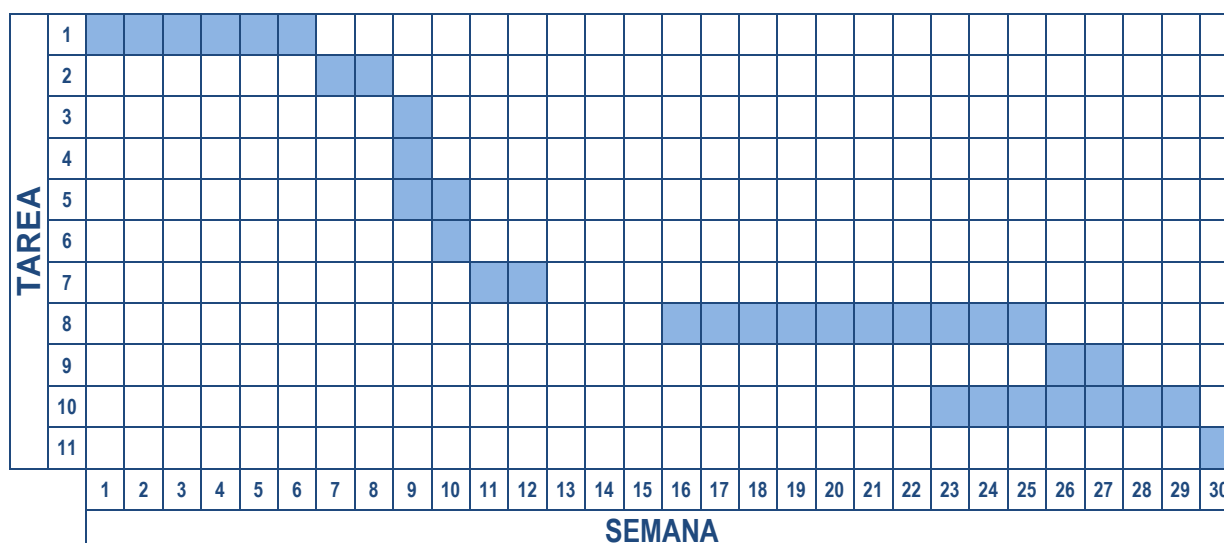
El alcance de este proyecto es principalmente experimental, ya que está orientado a la ejecución en un laboratorio de metrología de ambos procedimientos de evaluación de cada normativa, para posteriormente, analizar detalladamente la directriz “VDI/VDE 2617” y comparar parámetros característicos obtenidos, con otros de la norma “ASME B89.4.22-2004”.

Este proyecto, como ya se ha comentado anteriormente, comprende la realización de mediciones en laboratorio mediante el brazo articulado de medición de coordenadas y el análisis posterior de los datos tomados mediante el software “FARO CAM2 MEASURE”, “MATLAB” y “OFFICE”. El material generado consta de una parte explicativa y otra experimental en la que se detallan mediante análisis y gráficos, los datos obtenidos.

2. PLANIFICACIÓN.

- Tarea 1: Conocimiento en profundidad de la norma “ASME B89.4.22-2004” y de la directriz “VDI/VDE 2617”.
- Tarea 2: Realización de manuales prácticos de ayuda, para ser usados durante la evaluación del brazo articulado de medición por coordenadas, en el laboratorio.
- Tarea 3: Conocimiento de funcionamiento del brazo articulado de medición por coordenadas “FARO Platinum”.
- Tarea 4: Manejo avanzado de las aplicaciones informáticas “FARO CAM2 MEASURE” y “MATLAB”.
- Tarea 5: Realización de una primera simulación de medición con el brazo articulado de medición por coordenadas, mediante la medición de las 15 esferas y la esfera fuera de línea de la barra patrón de esferas, tratando los puntos tomados posteriormente con MATLAB, obteniendo y caracterizando la esfera mediante la función “lssphere” en “MATLAB”.
- Tarea 6: Ejecución de las mediciones exigidas por la norma “ASME B89.4.22-2004”. Se generan simultáneamente archivos de texto donde se exportan desde el propio software del brazo articulado de medición por coordenadas, los datos referentes a los puntos tomados en la prueba.
- Tarea 7: Ejecución de las mediciones exigidas por la directriz “VDI/VDE 2617”. Se generan simultáneamente archivos de texto donde se exportan desde el propio software del brazo articulado de medición por coordenadas, los datos referentes a los puntos tomados en la prueba.
- Tarea 8: Realización mediante el uso de los software “MATLAB” y “EXCEL” de las evaluaciones exigidas para la directriz “VDI/VDE 2617” para determinar los errores y gráficos que indica dicha directriz, así como diferentes tipos de análisis gráficos, ampliando la información de errores y medidas tomadas,
- Tarea 9: Análisis comparativo entre la directriz “VDI/VDE 2617” y la norma “ASME B89.4.22-2004”.
- Tarea 10: Realización de la “memoria” y “anejos a la memoria” del presente Proyecto Fin de Carrera.
- Tarea 11: Revisión final del presente Proyecto Final de Carrera.

2.1. DURACIÓN DE LAS TAREAS.



Como se describe en el gráfico, para la realización del presente proyecto, se dividió el trabajo realizado en 11 tareas que se desarrollaron durante 30 semanas.

Destaca el tiempo empleado durante el comienzo del Proyecto Final de Carrera, el tiempo que costó conocer completamente ambas normativas, tanto la norma “ASME B89.4.22-2004” como la directriz “VDI/VDE 2617”. Ambas normativas, dado su carácter internacional son redactadas en inglés técnico, en un vocabulario no familiar que también hubo que conocer.

Además en este espacio de tiempo, fueron leídos diversos artículos y capítulos de tesis que abarcaban el estudio de normativas de evaluación de brazos articulados de medición por coordenadas.

Seguidamente, el tiempo empleado en la realización de sendas pruebas, tuvo que reducirse, debido al retraso en la entrega del trípode de apoyo del brazo articulado a la Universidad de Zaragoza, y que además debía ser utilizado por otras personas para actividades de investigación, por lo que el tiempo empleado en su conocimiento de funcionamiento y en la realización de las pruebas fue 4 semanas, lo que supuso una actividad intensiva en el laboratorio. En términos de fabricación, en el tiempo disponible de uso del laboratorio de metrología, se encuentra el “cuello de botella” del presente proyecto.

La última parte del proyecto, el análisis de datos, abarco aproximadamente el 50% del tiempo total empleado en la realización del proyecto, debido a la utilización de diferente software, importando y exportando entre ellos, gran cantidad de datos y cálculos, en los que se encontraron ciertas incoherencias, como ocurre en trabajos experimentales. Ello propició un retraso en el trabajo que estaba siendo realizado, sobre lo planificado.

3. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO REALIZADO.

A continuación se expone el trabajo que se ha realizado, centrado la actividad, en el trabajo de laboratorio, presentando la directriz “VDI/VDE 2617” mediante la cual se ha realizado la evaluación del brazo articulado de medición por coordenadas.

Seguidamente, se indica la evaluación realizada de acuerdo a dicha directriz. Análisis suplementarios realizados y el resumen de datos obtenidos en laboratorio, serán incluidos en el documento “Anejos a la memoria”.

3.1. VDI/VDE 2617.

3.1.1. PRUEBA DE ERROR DE PALPADO.

3.1.1.1. PRINCIPIO.

Para permitir una evaluación de error de palpado, la máquina de medición de coordenadas se verifica para su capacidad de realizar las mediciones de prueba que se describe a continuación dentro de los errores máximos permitidos, MPE o MPL . Estas mediciones se basan en la norma DIN EN ISO 10360-5 relativas a sistemas de palpado articulados. El principio de las pruebas es la medida de tamaño, forma y ubicación del material medido. En consecuencia, los resultados de la prueba se relacionan con los valores máximos permitidos, MPE_{PS} , para el tamaño S , MPE_{PF} , por la forma F , y MPL_{PL} , para la ubicación L del material medido. La letra subíndice P representa el palpado. La designación completa conforme a la norma DIN EN ISO 10360-5 estaría comprendida por más letras subíndice: T (por tacto) e I (para deducir, es decir, los parámetros del palpado se derivan indirectamente por el software de la máquina para las posiciones angulares del sistema de exploración que difieren significativamente de las pocas posiciones angulares usadas para la calificación empírica). Estas letras subíndice se omiten aquí en aras de la simplicidad puesto que la presente guía se refiere exclusivamente a las máquinas para las que ambas condiciones son verdaderas.

3.1.1.2. SISTEMA DE MEDICIÓN.

El material medido utilizado para la prueba de error de palpado es una esfera patrón cuyo diámetro nominal es de 21,9988 mm. En esta prueba, debe ser calibrada la forma y el diámetro de la esfera. El error de forma deberá ser inferior a 20% de la MPE_{PF} . El accesorio de sujeción de la esfera patrón empleado deberá ser tan rígido como sea posible.

Esto es necesario, particularmente, para disposiciones en alturas elevadas donde se recomienda sujetar la esfera patrón con el montaje disponible sobre un bloque de base estable. No es admisible usar la esfera de referencia como esfera patrón.

3.1.1.3. PROCEDIMIENTO.

La esfera patrón se dispone en tres posiciones diferentes en el volumen de medición del brazo articulado de medición por coordenadas. En relación con el eje vertical principal y el nivel cero de la máquina, estas posiciones tendrán que, si es posible, encontrarse en los rangos siguientes:

- Entre tres sectores de 120°.
- En distancias menores de 30%, entre 30% y el 70% y más del 70% de la longitud del brazo útil, y a una altura aproximadamente del -20%, 0% y +50% de la longitud del brazo útil.

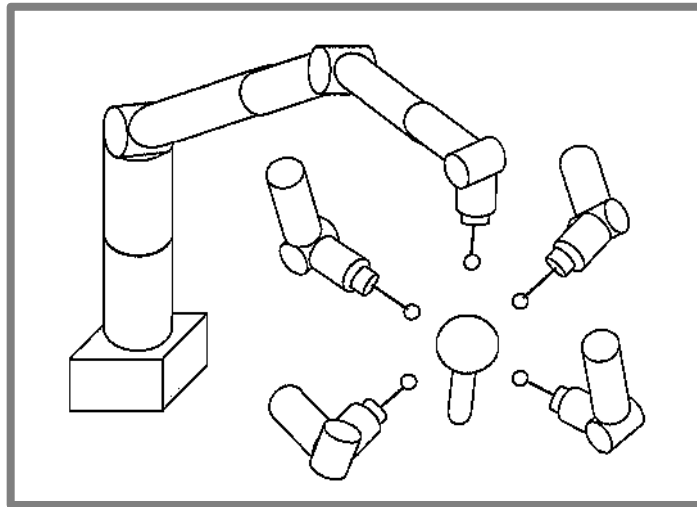
La asignación de los sectores, distancias y alturas de centro son arbitrarias, siempre que las posiciones resultantes permitan la medición de la esfera.

En cada una de las tres posiciones, se palpan cinco puntos distribuidos sobre un hemisferio de la esfera patrón. Si es posible, un punto debe ser tomado en el polo en la dirección de palpado, y cuatro puntos deben ser tomados distribuidos equidistantemente a lo largo del ecuador a fin de permitir medidas por contacto libre. Esta medición de cinco puntos, se repite cinco veces usando diferentes orientaciones de palpado en cada caso. Las orientaciones de palpado, de ser posible, deben coincidir aproximadamente con las direcciones x, y, z del sistema de coordenadas (similar a una configuración de palpado en estrella en una máquina de medición por coordenadas). Por lo tanto, se miden 25 puntos sobre la esfera patrón, en cada posición de la prueba, es decir, un total de 75 puntos de medida.

Dentro del rango especificado por el fabricante, cualquier distancia de la punta del palpador desde la primera articulación ("muñeca") puede ser elegida. Se hará constar en el certificado de prueba.

Los sistemas que utilizan palpadores rígidos y los sistemas que utilizan sistemas de palpado (tipo de conmutación) se tratan del mismo modo.





Prueba de error de palpado utilizando cinco orientaciones del palpador.

3.1.1.4. EVALUACIÓN.

3.1.1.4.1. ERROR DE PALPADO DE POSICIÓN DE LA ESFERA.

De cada grupo de cinco puntos de medición, se calcula la regresión gaussiana de la esfera utilizando el método de mínimos cuadrados. Para cada posición de la prueba, se obtienen cinco centros de esfera que tienen coordenadas x , y , z . Se calcula la distancia máxima entre dos de estos cinco centros. Finalmente, la mayor distancia de las tres máximas para las tres posiciones de la esfera, es el error de palpado, PL , de posición de la esfera.

Nota: Para cada posición de la prueba, se obtienen diez distancias entre los centros, es decir, 30 en total, la mayor de las cuales es PL .

3.1.1.4.2. ERROR DE PALPADO DE TAMAÑO.

De los 25 puntos medidos por cada posición de la prueba, se calcula la regresión gaussiana de la esfera utilizando el método de mínimos cuadrados. Para cada una de las tres posiciones de la esfera, se determina la desviación del diámetro de la esfera comparándolo con el valor de calibración de la esfera. El mayor valor absoluto de los errores de diámetro para las tres posiciones de la esfera, es el error de palpado, PS , de tamaño.

3.1.1.4.3. ERROR DE PALPADO DE FORMA.

De acuerdo a la regresión calculada para la evaluación anterior (párrafo 3.1.1.4.2.), se calcula para cada posición de la prueba, el rango de radios de todos los 25 puntos de medida, es decir, las distancias desde el centro común. El mayor de los rangos de los radios de las tres posiciones de la prueba es el error de palpado, PF , de forma.

3.1.2. PRUEBA DE ERROR DE INDICACIÓN DEL TAMAÑO DE LA MEDICIÓN.

3.1.2.1. PRINCIPIO.

Para permitir una evaluación de la precisión geométrica, la máquina de medición de coordenadas de brazo articulado se verifica por su capacidad de realizar mediciones de tamaño entre el error máximo permisible de indicación, MPE_E . La evaluación se lleva a cabo comparando los valores de calibrado de la barra patrón de esferas con los valores medidos. Similar al procedimiento aplicado para las máquinas de medición por coordenadas, la barra patrón de esferas se dispone en varias posiciones y orientaciones (medición de líneas).

3.1.2.2. SISTEMA DE MEDICIÓN.

Los patrones utilizados son unidimensionales tales como una pila de bloques patrón, bloques patrón escalonados, barra de esferas, banda de esferas o bandas perforadas. Los patrones deben permitir determinar al menos cinco longitudes a lo largo de una línea de medida. Las longitudes del patrón medido deben estar calibradas.

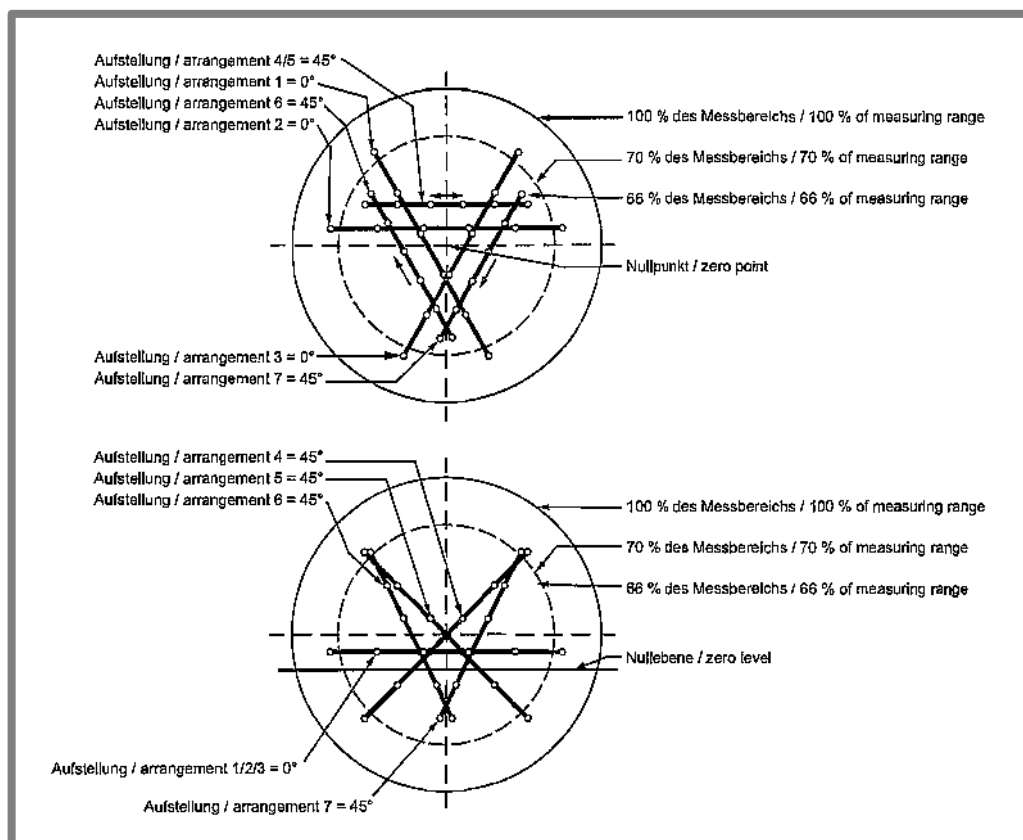
3.1.2.3. PRUEBA DE ERROR DE INDICACIÓN DEL TAMAÑO DE LA MEDICIÓN DENTRO DEL VOLUMEN DE MEDICIÓN COMPLETO.

3.1.2.3.1. PROCEDIMIENTO.

Si es posible, la mayor longitud de tamaño del patrón será al menos igual al 66% de la capacidad de medición útil del brazo articulado. A falta de un patrón lo suficientemente largo, se permite realizar mediciones consecutivas desplazando un patrón de menor tamaño a lo largo de la línea de medición.

El patrón se medirá (de conformidad con la norma DIN EN ISO 10360-2) en al menos siete disposiciones (posición y dirección) que pueden ser elegidas arbitrariamente por el usuario. A diferencia de las máquinas de medición por coordenadas, un brazo articulado permite llegar a un punto en el volumen de medición con una multitud de diferentes orientaciones de brazo, lo que hace más difícil captar la acción combinada de las influencias de error. Es, por tanto, por lo que se recomienda el uso de las siguientes disposiciones del patrón en el volumen de medición del brazo articulado.

- Los puntos finales de la mayor longitud utilizada en la prueba (por lo menos el 66% del rango de medición usado), si es posible, se encuentran dentro de una envoltura esférica que conforman el 70% al 100% de la capacidad de medida.
- De ser posible, el patrón se dispone en tres sectores de aproximadamente 120° cada uno del volumen de medida. Es posible reubicar o girar el brazo articulado en lugar de la barra patrón.
- En uno de los sectores, si es posible, la barra patrón se dispone en una posición horizontal y en posiciones oblicuas cruzadas y en cada uno de los otros dos sectores, una posición horizontal y sólo una posición oblicua. Estas dos últimas disposiciones oblicuas, de ser posible, están inclinadas en direcciones opuestas, cuando se ve desde fuera del volumen de medida en dirección radial.

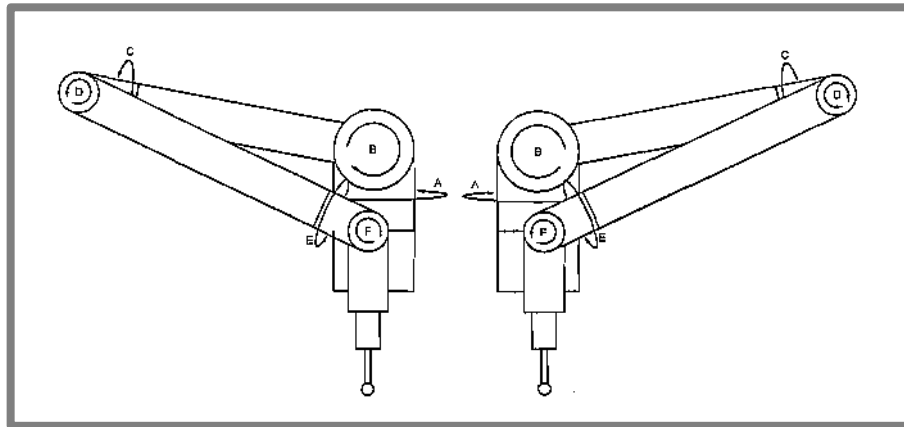


Disposición del patrón en el volumen de medida (vista superior arriba, vista frontal abajo).

En la selección de las líneas de medición, se ha tenido en cuenta que el error de influencias en las mediciones dependen en gran medida de la posición de los distintos segmentos del brazo articulado uno respecto al otro, de la inclinación de la respectiva línea de medida y de la de distancia medida desde el punto cero de la máquina.

Para cada disposición de la barra patrón, al menos cinco longitudes son medidas, cada una de las cuales, debe ser medida en tres ocasiones. Para cada una de las siete disposiciones de la barra patrón, se obtienen al menos 15 longitudes. El número total de longitudes medidas a lo largo de la prueba no es inferior a 105.

En dos de las tres mediciones, la longitud de la prueba se determinará utilizando las posiciones de los extremos opuestas del eje A del brazo articulado sometido a la prueba. Esto pone de relieve influencias debido a los efectos de histéresis en los errores de indicación para la medición de la longitud.



Disposición de las posiciones extremo opuesto del eje A.

El palpado de los elementos en función del patrón se llevará a cabo como se especifica en la norma EN ISO 10360-2 o VDI/VDE 2617 Parte 2.1 y Parte 2.3. Bloques patrón y bloques patrón escalonados, se alinearán con la ayuda de un ordenador de acuerdo con la norma VDI/VDE 2617 Parte 2.1 y se palpará en ambas direcciones, con cada uno de los puntos en el centro de las caras de medida izquierda y derecha.

En el caso de elementos esféricos, cada uno de los cinco puntos se palpa de acuerdo con la norma VDI/VDE 2617 Parte 2.3. Como cuestión de principio, los resultados obtenidos aquí son diferentes de los obtenidos por el punto discreto bidireccional tomado en los bloques patrón o bloques patrón escalonado. Esto se debe al hecho de que en elementos esféricos se palpan más puntos y que las desviaciones del diámetro del palpador no tienen ningún efecto aquí. Sin embargo, en contraste con los sistemas cartesianos, los efectos sistemáticos se anulan recíprocamente, en una medida mucho menor en brazos articulados; las influencias debido a la cinemática del brazo articulado y al operador son más significativas. La diferencia directa con respecto a las características de bloques patrón y bloques patrón escalonados, por tanto, se descuidan aquí y no se hacen correcciones como es común con máquinas de medición de coordenadas cartesianas.

En el caso de mediciones consecutivas, una vez la primera posición se ha medido, la barra patrón se desplaza por toda su longitud en la dirección de la medición y el primer elemento característico se posiciona aproximadamente en ese punto donde el último estaba situado anteriormente. Las mediciones se ven facilitadas considerablemente por un medio adecuado para cambiar el patrón a lo largo de la línea de medida. Si es posible, las posiciones individuales se superponen en las uniones, ya sea totalmente o por unos pocos milímetros. La barra patrón se mide en tantas posiciones como sea necesario para cubrir aproximadamente el 66% de la capacidad de medición útil. En total, se miden por lo menos cinco longitudes de prueba en cada línea de medida.

3.1.2.3.2. EVALUACIÓN.

Para cada medida individual, el error de indicación de la longitud medida, E , se calculará en función de la diferencia entre el valor indicado y el valor de calibrado de la barra patrón de esferas.

Como regla general, las esferas individuales de una barra de esferas no se encuentran en una línea recta ideal. Por tanto, solo se puede evaluar la distancia entre esferas colindantes, en vez de evaluar directamente la distancia espacial entre dos esferas. Entonces, lo que se evalúa es la longitud de una línea poligonal que pasa por todos los centros de esfera intermedios (véase también la norma VDI/VDE 2617 Parte 2.3).

Asimismo, en el caso de las medidas consecutivas, los elementos característicos no se encuentran necesariamente en una línea recta ideal. El error indicado para la medición es, por tanto, calculado a lo largo de varias posiciones, como con la barra de esferas, en función de la suma de los errores individuales de la indicación para la medición.

El descentramiento del brazo articulado puede corregirse computacionalmente si la máquina está equipada con los medios adecuados y los valores son siempre corregidos incluso en el funcionamiento normal de la medición. No son permisibles correcciones manuales de los valores de salida por la computadora para tener en cuenta la temperatura u otros factores siempre que se respeten las condiciones ambientales especificadas por el fabricante. Una corrección de la temperatura sólo se puede aplicar al valor medido del patrón si esta opción está prevista en el software de evaluación del brazo articulado, y si la máquina se utiliza de la misma manera durante el funcionamiento normal de la medición.

Los errores de indicación para la medición, E , junto con sus valores límite, MPE_E , se presentarán en un diagrama de conjunto para todas las disposiciones de la prueba.

3.1.2.4. PRUEBA DE ERROR DE INDICACIÓN DEL TAMAÑO DE LA MEDICIÓN DENTRO DEL VOLUMEN DE MEDICIÓN PARCIAL.

3.1.2.4.1. PROCEDIMIENTO.

La realización de pruebas de medición de volúmenes parciales se permite sólo donde esté disponible una barra patrón más corta que el 66% del volumen de medición útil, con el cuerpo en posición diagonal.

La barra patrón se debe medir en cada volumen parcial a lo largo de no menos de tres líneas de medida que interseccionan ortogonalmente. En cualquier caso, se debe incluir las posiciones diagonales.

Considerar lo siguiente cuando se determinan los volúmenes parciales:

- a) Los volúmenes parciales individuales deben superponerse.
- b) La diagonal de un volumen parcial debe ser igual al menos al 40% de la capacidad de medida (correspondiente a 5/8 del 66% de la capacidad de medida).
- c) El número mínimo de volúmenes parciales es de tres.
- d) Los volúmenes parciales se distribuyen uniformemente a lo largo de todo el volumen de medida.
- e) La mayor diagonal del volumen de medida debe estar cubierta en su totalidad por los volúmenes parciales.

Se fija la ubicación y el tamaño de cada volumen parcial.

Se recomienda dividir el volumen completo de medida en cuatro volúmenes parciales esféricos de igual tamaño, cuyos diámetros sean equivalentes al menos al 40% del volumen de medida y que permita tres disposiciones de medida como se especifica.

Como se describe en la Sección 3.1.2.3.1., al menos cinco longitudes son medidas para cada disposición de la barra patrón. De nuevo, cada una de las longitudes debe ser medida en tres ocasiones, obteniendo al menos 15 longitudes para cada una de las al menos nueve líneas de medida. El número total de longitudes medidas a lo largo de la prueba, será no inferior a 135.

En dos de las tres mediciones, la longitud de la prueba se determinará utilizando las posiciones de los extremos opuestas del eje A del brazo articulado sometido a la prueba. Esto pone de relieve influencias debido a los efectos de histéresis en los errores de indicación para la medición de la longitud.

El palpado de los elementos en función del patrón se llevará a cabo como se especifica en la norma EN ISO 10360-2 o VDI/VDE 2617 Parte 2.1 y Parte 2.3. Bloques patrón y bloques patrón escalonados, se alinearán con la ayuda de un ordenador de acuerdo con la norma VDI/VDE 2617 Parte 2.1 y se palpará en ambas direcciones, con cada uno de los puntos en el centro de las caras de medida

izquierda y derecha. En el caso de elementos esféricos, cada uno de los cinco puntos se palpa de acuerdo con la norma VDI/VDE 2617 Parte 2.3.

3.1.2.4.2. EVALUACIÓN.

Para cada medida individual, el error de indicación de la longitud medida, E , se calculará en función de la diferencia entre el valor indicado y el valor de calibrado de la barra patrón de esferas.

Como regla general, las esferas individuales de una barra de esferas no se encuentran en una línea recta ideal. Por tanto, solo se puede evaluar la distancia entre esferas colindantes, en vez de evaluar directamente la distancia espacial entre dos esferas. Entonces, lo que se evalúa es la longitud de una línea poligonal que pasa por todos los centros de esfera intermedios (véase también la norma VDI/VDE 2617 Parte 2.3).

El descentramiento del brazo articulado puede corregirse computacionalmente si la máquina está equipada con los medios adecuados y los valores son siempre corregidos incluso en el funcionamiento normal de la medición. No son permisibles correcciones manuales de los valores de salida por la computadora para tener en cuenta la temperatura u otros factores siempre que se respeten las condiciones ambientales especificadas por el fabricante. Una corrección de la temperatura sólo se puede aplicar al valor medido del patrón si esta opción está prevista en el software de evaluación del brazo articulado, y si la máquina se utiliza de la misma manera durante el funcionamiento normal de la medición.

Los errores de indicación para la medición, E , junto con sus valores límite, MPE_E , se presentarán en un diagrama de conjunto para todas las disposiciones de la prueba en los volúmenes parciales. Se fija la ubicación y el tamaño de cada volumen parcial.

3.2. TRATAMIENTO DATOS MATLAB-EXCEL.

Finalmente, el proceso acabara importando al software MATLAB los datos conocidos de la esfera, para obtener su centro y radio exacto que es proporcionado mediante el uso de la función “Issphere” de cálculo mediante mínimos cuadrados.

Por tanto, una vez en MATLAB y mediante el uso de la función “Issphere”, introducimos los datos de entrada en la siguiente estructura:

Issphere(X, x0, r, tolp, tolg)

Siendo:

- X: Matriz 10x3 con las posiciones x, y, z de los 10 puntos tomados en la superficie de cada esfera.
- x0: Matriz 3x1 con el centro estimado de la esfera en coordenadas x, y, z, calculado mediante la media de cada coordenada de todos los puntos tomados sobre la superficie de la esfera. Este dato es necesario para que el software tenga un punto de partida sobre el que empezar a realizar sus cálculos.
- r: Radio estimado de la esfera. Todas las esferas de la barra patrón tienen un diámetro nominal de 22 mm, por lo que introducimos un valor de radio de 11 mm. $r = 11$.
- tolp: Tolerancia para la prueba de longitud de paso. $tolp = 1$.
- tolg: Tolerancia para la prueba de gradiente. $tolg = 1$.

Con esta expresión, el software devuelve únicamente el centro calculado para la esfera en coordenadas x, y, z. Para obtener otros parámetros adicionales que caracterizan en mayor medida, tanto la esfera, como la medición realizada con el brazo articulado, se introduce la siguiente expresión:

[x0n, rn, d, sigmah, conv, Vx0n, urn, GNlog, a, R] = Issphere(X, x0, r, tolp, tolg)

Donde el segundo miembro de la expresión es el mismo al introducido anteriormente con los valores de cada esfera.

Mediante esta expresión, el software calcula los siguientes valores necesarios para caracterizar a la esfera:

- x0n: Matriz 3x1 del centro estimado de la esfera en coordenadas x, y, z, calculado por el software.
- rn: Radio de la esfera calculado por el software.
- d: Vector de la distancia radial de los puntos introducidos a la esfera.
- sigmah: Estimación de la desviación estándar.
- urn: Incertidumbre del radio de la esfera.

3.3. DOCUMENTACIÓN GENERADA.

A continuación se presentan las 2 evaluaciones realizadas de acuerdo a la directriz “VDI/VDE 2617”, presentando únicamente lo especificado por dicha directriz. Cada evaluación ha sido realizada por un operador distinto a fin de poder comparar los resultados obtenidos.

Mediante la ejecución de la evaluación de brazo articulado de medición por coordenadas, especificada en la directriz “VDI/VDE 2617”, se caracterizaron, en cada evaluación, 585 esferas, siendo datos obtenidos de cada esfera, los puntos tomados sobre la superficie y el centro de la esfera que calcula el software de control del brazo articulado de medición por coordenadas “FARO2 CAM MEASURE”.

Posteriormente, después del profundo análisis de datos llevado a cabo mediante software, se calculan los errores y gráficas que la directriz hace constar.

Análisis suplementarios realizados y el resumen de datos obtenidos en laboratorio, serán incluidos en el documento “Anejos a la memoria”, así como una comparativa entre la directriz “VDI/VDE 2617” y la norma “ASME B89.4.22-2004”.

3.3.1. PRUEBA DE ERROR DE PALPADO.

La evaluación del brazo articulado de medición por coordenadas FARO “Platinum” según la normativa descrita, se realiza en el laboratorio de metrología de la Universidad de Zaragoza, en Zaragoza, entre los días 9 y 14 de diciembre de 2009, siendo necesario emplear un tiempo aproximado de 12 horas de trabajo en laboratorio para la realización de cada una de las dos evaluaciones ejecutadas mediante dos operadores distintos.

Las condiciones ambientales para la realización de la citada evaluación, es de una temperatura de 20°C (error $\pm 1^\circ\text{C}$) en el laboratorio de metrología, siendo la temperatura indicada por el brazo articulado de 26°C (error $\pm 1^\circ\text{C}$).

3.3.1.1. ERROR DE PALPADO DE POSICIÓN DE LA ESFERA.

PL _{OPERARIO 1}	0.0651 mm
PL _{OPERARIO 2}	0.1965 mm

3.3.1.2. ERROR DE PALPADO DE TAMAÑO.

PS _{OPERARIO 1}	0.0334 mm
PS _{OPERARIO 2}	0.0148 mm

3.3.1.3. ERROR DE PALPADO DE FORMA.

PF _{OPERARIO 1}	0.0893 mm
PF _{OPERARIO 2}	0.2570 mm

3.3.2. PRUEBA DE ERROR DE INDICACIÓN DEL TAMAÑO DE LA MEDICIÓN.

3.3.2.1. PRUEBA DE ERROR DE INDICACIÓN DEL TAMAÑO DE LA MEDICIÓN DENTRO DEL VOLUMEN DE MEDICIÓN COMPLETO.

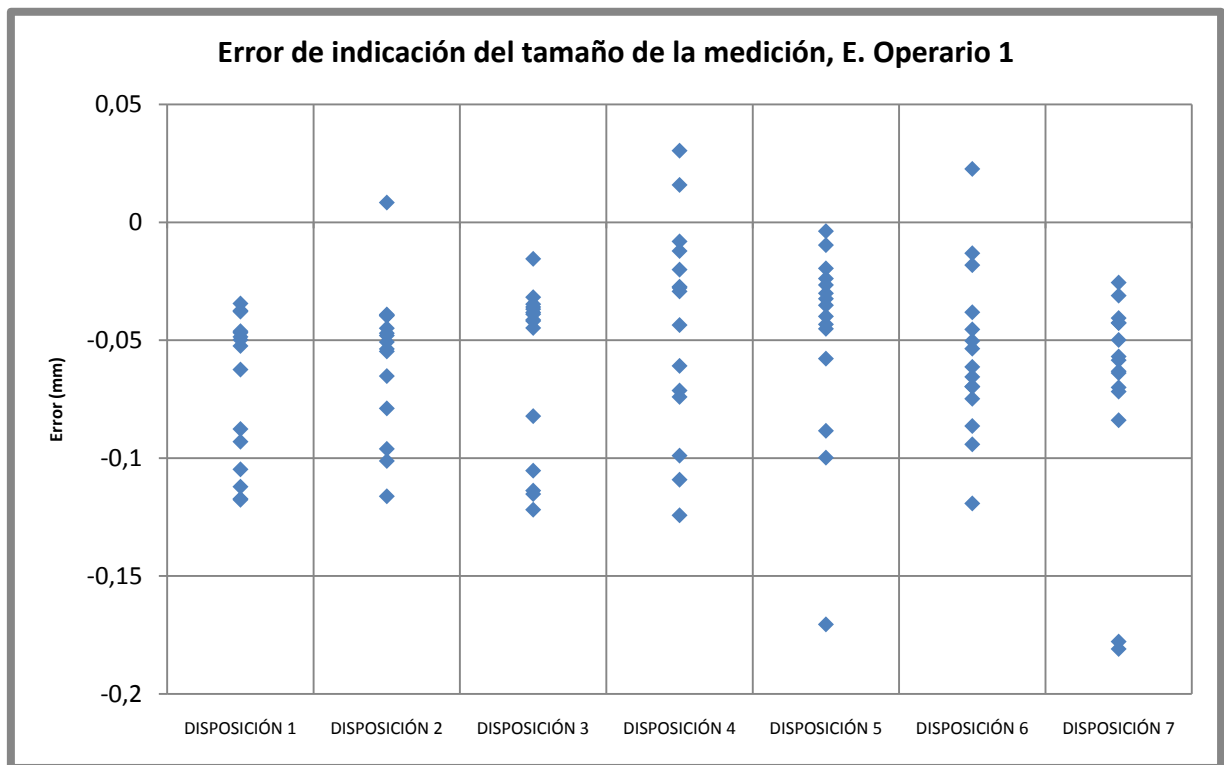
En la evaluación siguiente, se presenta el error que resulta de la diferencia entre 2 centros de esfera de la barra patrón esferas, considerando la medida obtenida mediante el brazo articulado y la medida calibrada de dicho patrón.

En primer lugar se presenta este error según las disposiciones de la barra patrón de esferas dentro del volumen de medición completo. Seguidamente, el mismo error es representado en función de la longitud medida, incluyendo conjuntamente, la recta MPE_E , que representa los valores límites de error en función de la distancia de medición. Dicha recta, es calculada en el documento “Anejos a la memoria”, a partir de todos los errores obtenidos en la “prueba de error de indicación del tamaño de la medición” para los 2 operarios.

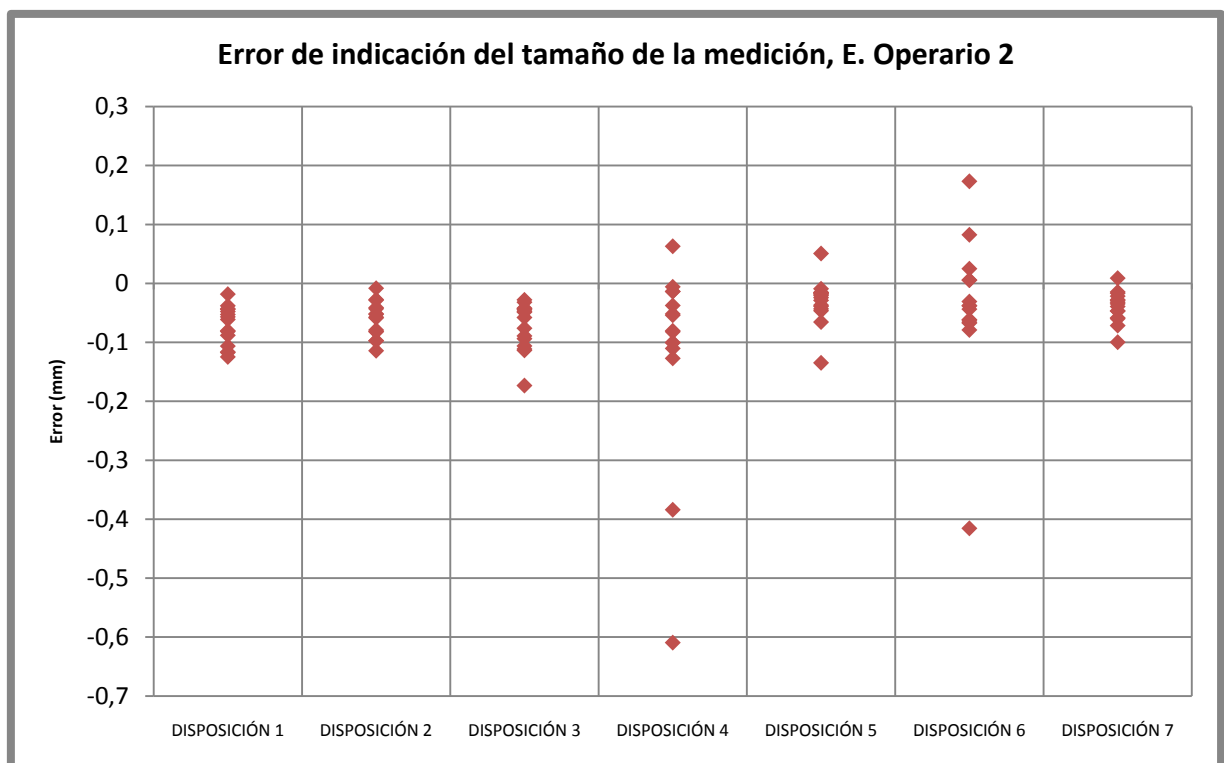
Los gráficos se representan para las evaluaciones realizadas por dos operadores. Para cada una de las evaluaciones fueron medidas 210 esferas, en 7 disposiciones distintas, midiendo 5 longitudes distintas y repitiendo cada medida en 3 ocasiones, obteniendo finalmente 105 errores para la prueba.

Cabe destacar como información, que la directriz “VDI/VDE 2617”, especifica para esta prueba, que: *“si es posible, la mayor longitud de tamaño del patrón será al menos igual al 66% de la capacidad de medición útil del brazo articulado. A falta de un patrón lo suficientemente largo, se permite realizar mediciones consecutivas desplazando un patrón de menor tamaño a lo largo de la línea de medición”*. Para la realización de esta prueba, se dispone de un brazo articulado de medición por coordenadas cuyo volumen de medida es de 2400 mm y una barra de esferas patrón que establece una longitud máxima de 1400 mm.

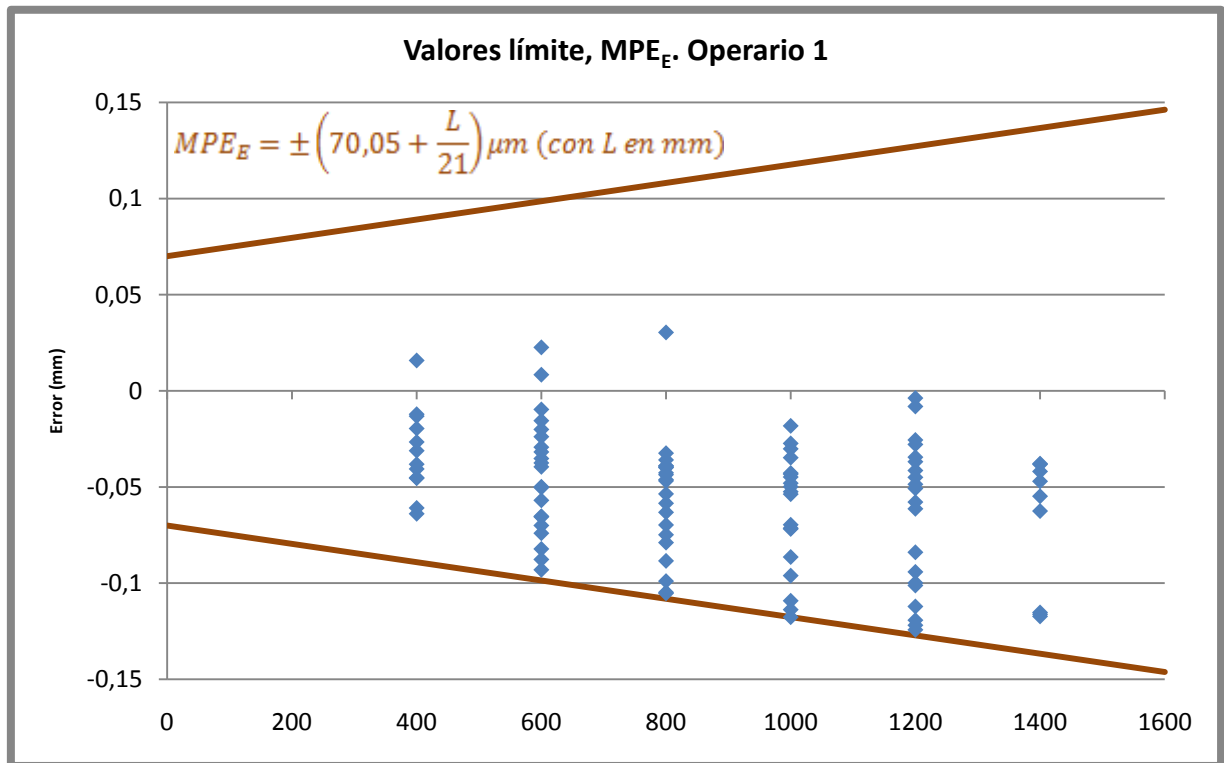
Esto es, de acuerdo con la norma, se debería disponer de un patrón de 1584 mm, lo que supondría 184 mm de longitud posible para dicho patrón, aproximadamente, un patrón con las mismas características que dispusiera de 2 esferas más. Por el contrario, debido a la mínima diferencia que supone, y a que la normativa no es estricta en este punto y no obliga a disponer de un patrón mayor, sino que únicamente lo recomienda, y debido a que las mayoría de medidas se realizan entre 600 mm y 1200 mm, se opta por realizar las mediciones directamente sobre la barra de esferas patrón que se dispone, evitando realizar correcciones a posteriori debido a movimientos en el patrón.



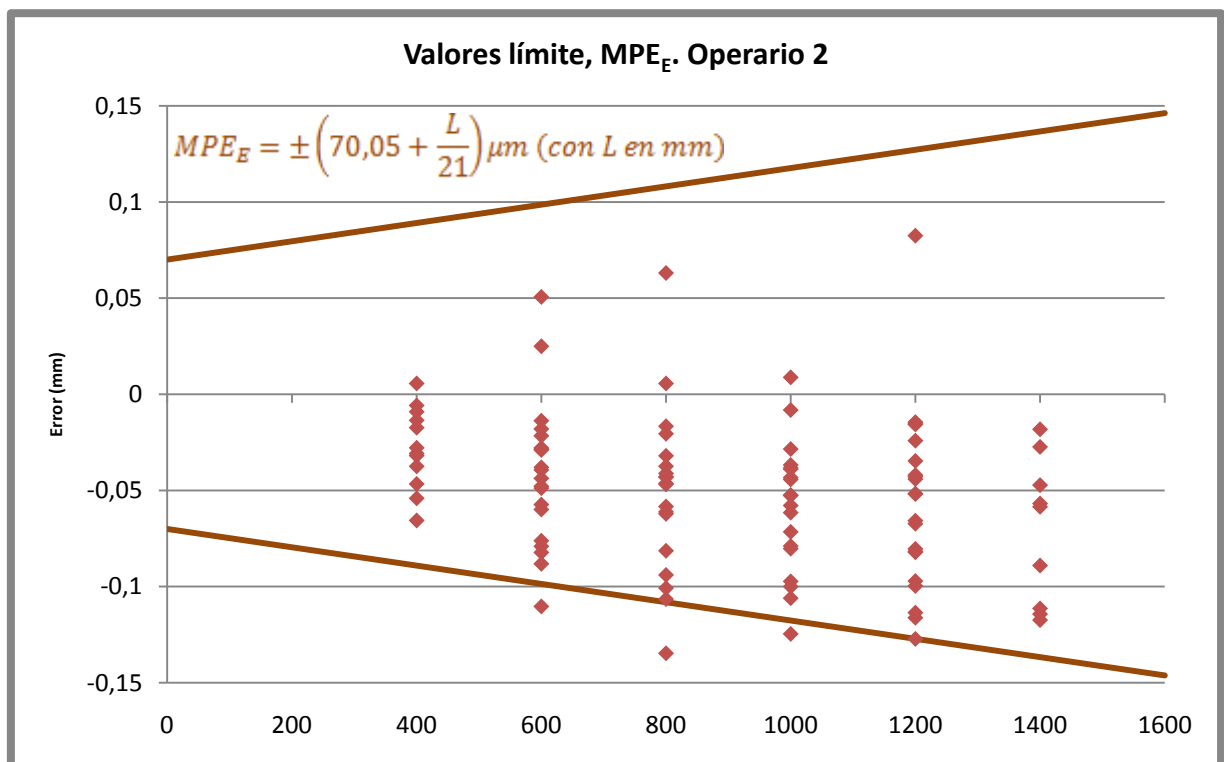
Error de indicación del tamaño de la medición dentro del volumen completo, según disposiciones. Operario 1.



Error de indicación del tamaño de la medición dentro del volumen completo, según disposiciones. Operario 2.



Valores límite, MPE_E , para la “prueba de error de indicación del tamaño de la medición dentro del volumen medición completo”. Operario 1.



Valores límite, MPE_E , para la “prueba de error de indicación del tamaño de la medición dentro del volumen medición completo”. Operario 2.

Tras los gráficos presentados se observa que existen errores que pueden considerarse como datos espurios o no característicos de la precisión de la máquina evaluada, pero se contabiliza a efectos prácticos como dato medido. Esta situación es especialmente visible en los errores obtenidos a partir de los datos del operario 2.

DATOS CONSIDERADOS ESPURIOS.

OPERARIO 1		
Disposición	Longitud (mm)	Observación
5	1000	Error = -0,1705 mm. Longitud 2, repetición 3. El error es un 465% mayor respecto a la media de errores de las otras 2 repeticiones de la misma medida.
7	1200	Error = -0,1810 mm. Longitud 1, repetición 3. El error es un 331% mayor respecto a la media de errores de las otras 2 repeticiones de la misma medida.
7	1000	Error = -0,1778 mm. Longitud 2, repetición 3. El error es un 311% mayor respecto a la media de errores de las otras 2 repeticiones de la misma medida.

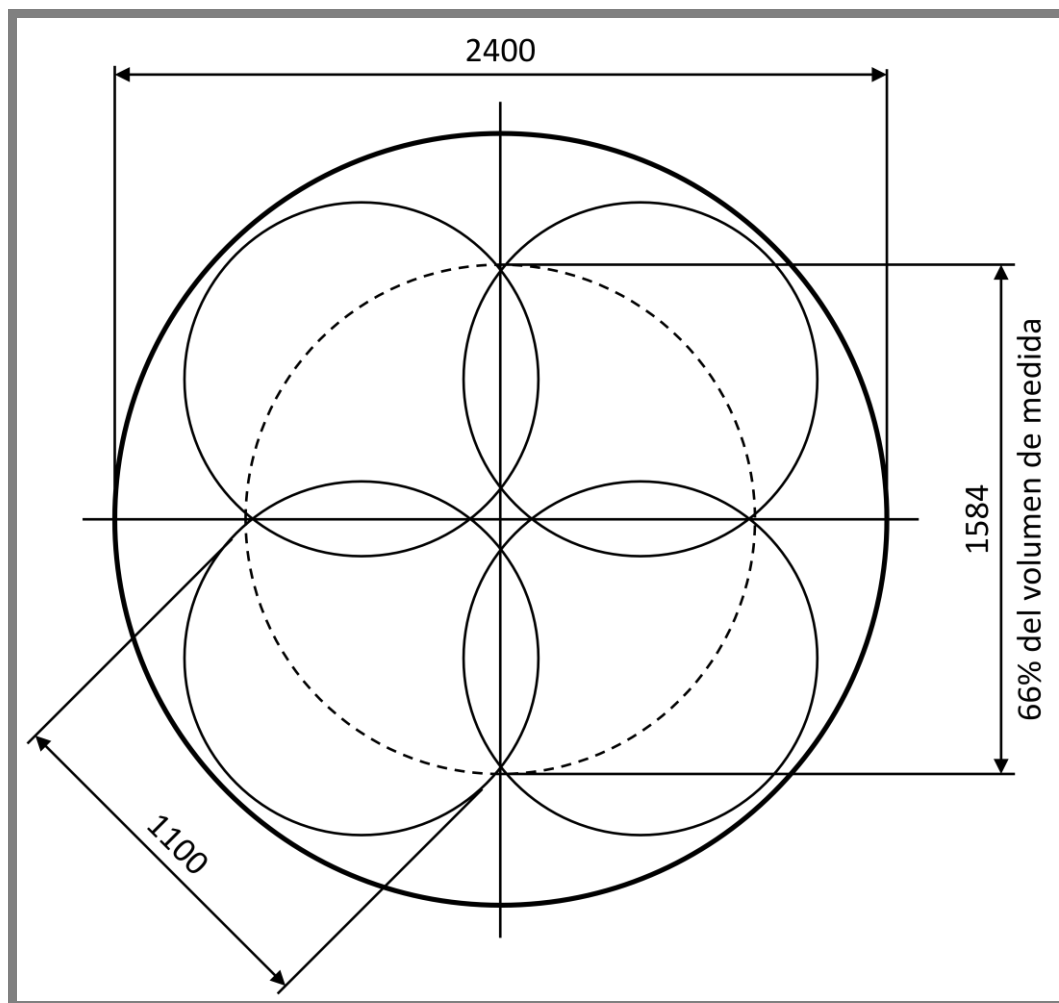
OPERARIO 2		
Disposición	Longitud (mm)	Observación
1	1000	Error = -0,1246 mm. Longitud 3, repetición 2. El error es un 188% mayor respecto a la media de errores de las otras 2 repeticiones de la misma medida.
3	800	Error = -0,1732 mm. Longitud 4, repetición 3. El error es un 275% mayor respecto a la media de errores de las otras 2 repeticiones de la misma medida.
4	1000	Error = -0,3839 mm. Longitud 2, repetición 1. El error es un 384% mayor respecto al error de la repetición dentro de tolerancias, de la misma medida.
4	1000	Error = -0,6093 mm. Longitud 2, repetición 3. El error es un 609% mayor respecto al error de la repetición dentro de tolerancias, de la misma medida.
4	600	Error = -0,1103 mm. Longitud 4, repetición 1. El error es un 230% mayor respecto al error de la repetición dentro de tolerancias, de la misma medida.
5	800	Error = -0,1347 mm. Longitud 3, repetición 3. El error es un 403% mayor respecto a la media de errores de las otras 2 repeticiones de la misma medida.
6	800	Error = 0,1734 mm. Longitud 3, repetición 2. El error es un 614% mayor respecto a la media de errores de las otras 2 repeticiones de la misma medida.
6	600	Error = -0,4156 mm. Longitud 4, repetición 2. El error es un 4451% mayor respecto a la media de errores de las otras 2 repeticiones de la misma medida.

3.3.2.2. PRUEBA DE ERROR DE INDICACIÓN DEL TAMAÑO DE LA MEDICIÓN DENTRO DEL VOLUMEN DE MEDICIÓN PARCIAL.

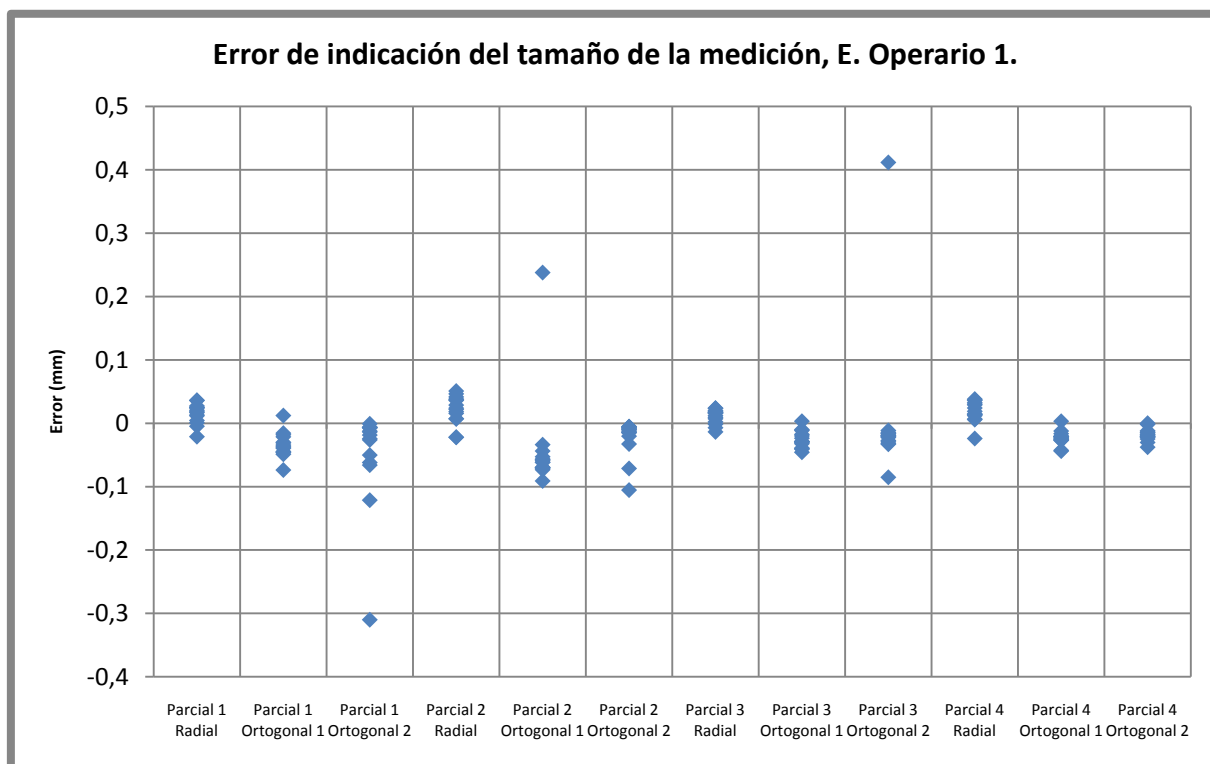
En la evaluación siguiente, se presenta el error que resulta de la diferencia entre 2 centros de esfera de la barra patrón esferas, considerando la medida obtenida mediante el brazo articulado y la medida calibrada de dicho patrón.

Como referencia para la prueba, y puesto que es exigido por la normativa evaluada, se indica gráficamente la ubicación y tamaño de cada volumen parcial. Asimismo, se presenta este error según tres disposiciones de la barra patrón de esferas dentro de cada uno de los cuatro volúmenes parciales en los que se realizan las mediciones. Seguidamente, el mismo error es representado en función de la longitud medida, incluyendo conjuntamente, la recta MPE_E , que representa los valores límites de error en función de la distancia de medición.

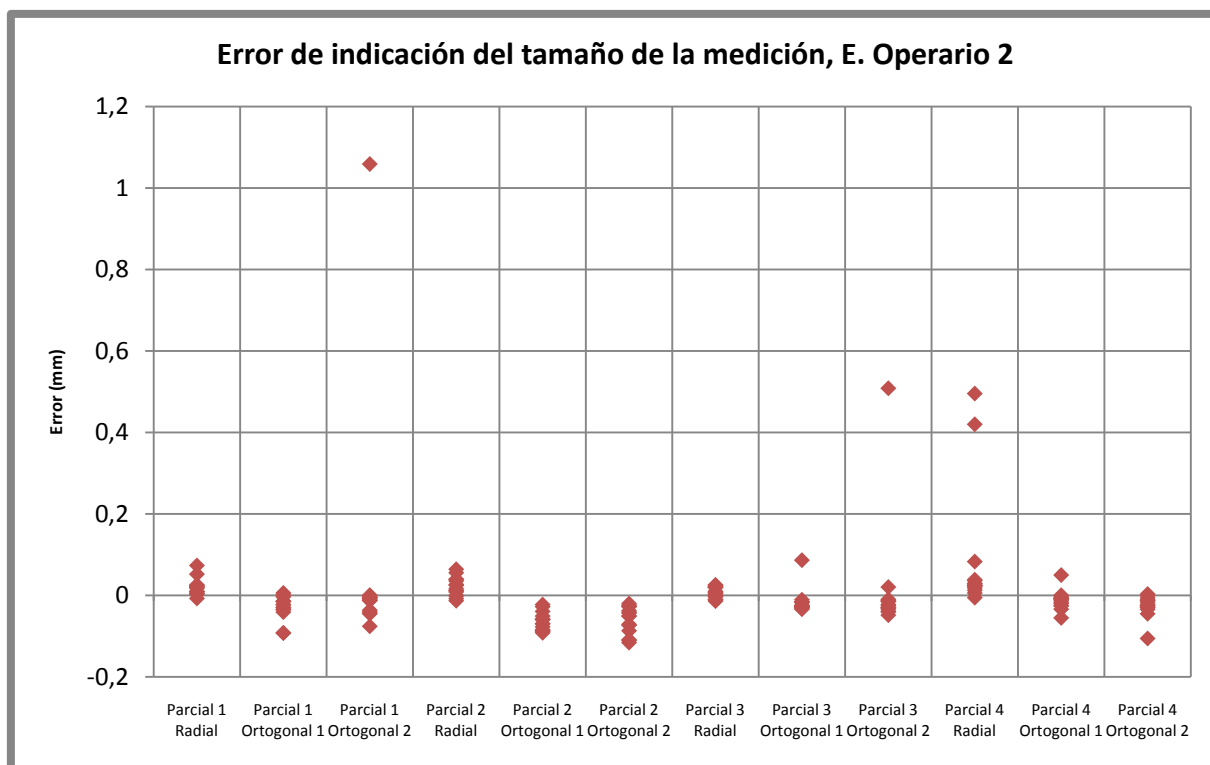
Los gráficos se representan para las evaluaciones realizadas por dos operadores. Para cada una de las evaluaciones fueron medidas 360 esferas, en 3 disposiciones distintas para cada uno de los 4 volúmenes parciales, midiendo 5 longitudes distintas y repitiendo cada medida en 3 ocasiones, obteniendo finalmente 180 errores para la prueba.



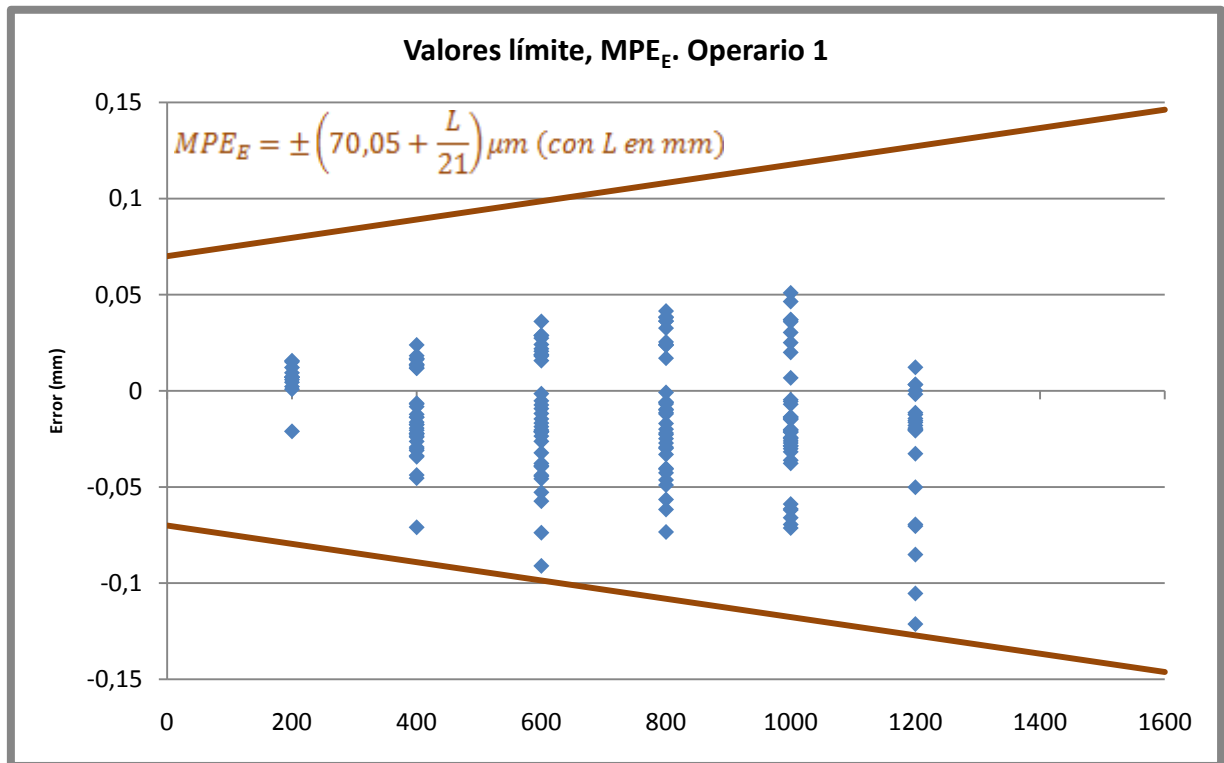
Disposición de los cuatro parciales de medida, dentro del volumen completo de medición.



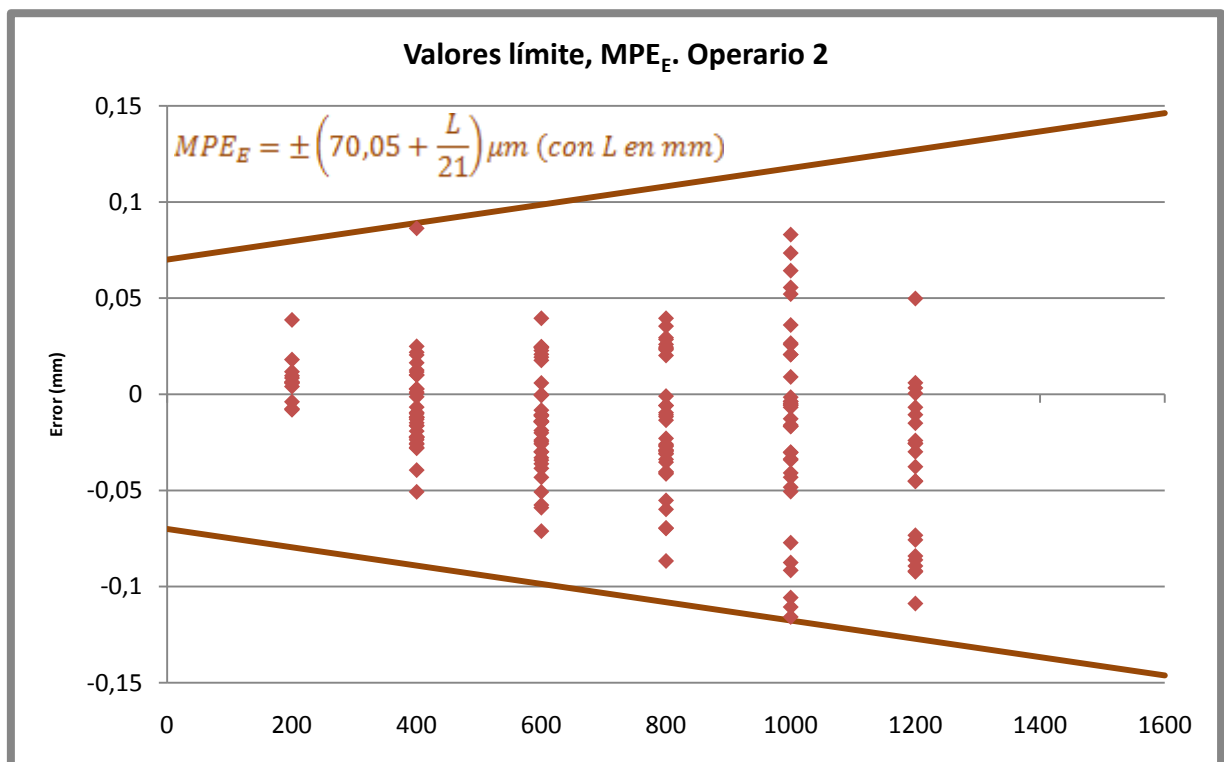
Error de indicación del tamaño de la medición dentro del volumen parcial, según disposiciones. Operario 1.



Error de indicación del tamaño de la medición dentro del volumen parcial, según disposiciones. Operario 2.



Valores límite, MPE_E , para la “prueba de error de indicación del tamaño de la medición dentro del volumen medición parcial”. Operario 1.



Valores límite, MPE_E , para la “prueba de error de indicación del tamaño de la medición dentro del volumen medición parcial”. Operario 2.

Tras los gráficos presentados se observa que existen errores que pueden considerarse como datos espurios o no característicos de la precisión de la máquina evaluada, pero se contabiliza a efectos prácticos como dato medido. Esta situación es especialmente visible en los errores obtenidos a partir de los datos del operario 2.

DATOS CONSIDERADOS ESPURIOS.

OPERARIO 1		
Disposición	Longitud (mm)	Observación
Parcial 1 Ortogonal 2	400	Error = -0,3101 mm. Longitud 5, repetición 3. El error es un 3010% mayor respecto a la media de errores de las otras 2 repeticiones de la misma medida.
Parcial 2 Ortogonal 1	1200	Error = 0,2378 mm. Longitud 1, repetición 3. El error es un 340% mayor respecto a la media de errores de las otras 2 repeticiones de la misma medida.
Parcial 3 Ortogonal 2	1200	Error = 0,4115 mm. Longitud 1, repetición 1. El error es un 788% mayor respecto a la media de errores de las otras 2 repeticiones de la misma medida.

OPERARIO 2		
Disposición	Longitud (mm)	Observación
Parcial 1 Ortogonal 2	1200	Error = 1,0588 mm. Longitud 1, repetición 2. El error es un 1751% mayor respecto a la media de errores de las otras 2 repeticiones de la misma medida.
Parcial 3 Ortogonal 2	12000	Error = 0,5086 mm. Longitud 1, repetición 1. El error es un 2267% mayor respecto a la media de errores de las otras 2 repeticiones de la misma medida.
Parcial 4 Radial	800	Error = 0,4201 mm. Longitud 2, repetición 3. El error es un 1447% mayor respecto a la media de errores de las otras 2 repeticiones de la misma medida.
Parcial 4 Radial	600	Error = 0,4954 mm. Longitud 3, repetición 3. El error es un 2034% mayor respecto a la media de errores de las otras 2 repeticiones de la misma medida.

3.4. CONFORMIDAD CON LAS ESPECIFICACIONES.

El rendimiento de la máquina de medición por coordenadas de brazo articulado se verifica si, teniendo en cuenta la incertidumbre del procedimiento de la prueba en conformidad con la norma DIN EN ISO 14253-1, se cumplen las siguientes condiciones:

- El error de palpado, PL, para la posición no supere su valor límite, MPE_{PL} .
- El error de palpado, PS, para el tamaño no sea superior a su valor límite, MPE_{PS} .
- El error de palpado, PF, para la forma no exceda de su valor límite, MPE_{PF} .

- El error de indicación del tamaño de la medición, E , no exceda de su valor límite, MPE_E .

Cuando se verifica la “prueba de error de indicación del tamaño de la medición”, sólo uno de los valores obtenidos puede quedar fuera del rango de conformidad por no más de cinco de las 35 longitudes de prueba. Cada longitud de la prueba que muestre un valor extremo se medirá otras diez veces en la respectiva posición y dirección. El rendimiento de la máquina de medición por coordenadas de brazo articulado se verifica si todos los valores del error de indicación para estas mediciones repetidas se encuentran dentro del rango de conformidad.

Si son más o menos, de 35 longitudes medidas en la prueba (como es el caso de medidas de volúmenes parciales o en las pruebas de verificación adicional y controles intermedios, respectivamente), el porcentaje de longitudes de la prueba que pueden quedar fuera del rango de conformidad, se adaptarán en consecuencia.

3.5. APLICACIONES.

A continuación se exponen las aplicaciones principales para las cuales ha sido elaborada la presente directriz evaluada.

3.5.1. PRUEBA DE ACEPTACIÓN.

En una provisión acordada por contrato entre un proveedor y un cliente, tales como:

- Contrato de compra.
- Contrato de mantenimiento.
- Contrato de reparación.
- Contrato de servicio.
- Contrato de adaptación.

Las pruebas especificadas en esta directriz pueden ser utilizadas para verificar el rendimiento de un brazo articulado de medición por coordenadas sobre la base de los valores límite, acordados entre el proveedor y el cliente.

El proveedor podrá especificar limitaciones (por ejemplo, prueba del diámetro de la esfera) a los errores máximos permisibles. En ausencia de estas limitaciones, los errores máximos permisibles se aplican a todas las condiciones y a cualquier posición y dirección dentro del volumen de medición del brazo articulado de medición por coordenadas.

3.5.2. PRUEBA DE NUEVA VERIFICACIÓN.

En el contexto de una inspección interna de una empresa de equipos de medición y ensayo, las pruebas de verificación se pueden realizar cada cierto intervalo regular de tiempo a fin de verificar el cumplimiento continuo de los errores máximos permisibles especificados para el brazo articulado de medición por coordenadas. Con este fin, los usuarios pueden especificar sus propios errores máximos permisibles y limitaciones.

3.5.3. ANÁLISIS PROVISIONAL.

En el contexto de una inspección interna de una empresa de equipos de medición y ensayo, se pueden realizar controles provisionales reducidos, a intervalos regulares, a fin de verificar el cumplimiento continuo de los errores máximos permisibles especificados para el brazo articulado de medición por coordenadas. Con este fin, los usuarios pueden especificar sus propios errores máximos permisibles y limitaciones y puede reducir el número de normas, distancias de medida, posiciones medidas y mediciones realizadas con respecto a las pruebas descritas en esta directriz.

Patrones alternativos de tamaño que pueden ser usados en lugar de los enumerados en el apartado 3.1.2.2., incluyen esferas o placas perforadas, cubos de esferas, tetraedros, octaedros y piezas calibradas.

4. DIFICULTADES Y DESVIACIONES RESPECTO A LA PLANIFICACIÓN.

RETRASO EN EL EJECUCIÓN DE LA EVALUACIÓN EN LABORATORIO.

La primera dificultad encontrada, surge en el momento de ejecutar sendos procedimientos de evaluación de brazos articulados de medición por coordenadas. En ese momento, el laboratorio de metrología de la Universidad de Zaragoza, no disponía de trípode de apoyo para el brazo articulado de medición por coordenadas, por lo que el comienzo de estas pruebas tuvo que retrasarse aproximadamente 2 meses, los cuáles fueron empleados para preparar los ensayos futuros a realizar mediante el conocimiento en profundidad de la directriz “VDI/VDE 2617” y la norma “ASME B89.4.22-2004”, así como realizar guías prácticas para la realización de las evaluaciones. Tras ello, en el momento de recibir por parte de la Universidad de Zaragoza, dicho trípode de apoyo, se realizaron los ensayos de manera intensiva durante 3 semanas.

ANÁLISIS DE DATOS.

En la etapa de análisis de datos, se observan ciertas medidas de radio de esfera, cuya desviación se encuentra fuera de los límites de tolerancia respecto al radio nominal de la esfera de la barra patrón de esferas.

Tras el análisis de los datos de cada esfera en particular, se observa que esta desviación se debe a que el operador cometió errores durante la captura de puntos sobre la superficie de la esfera. Es decir, ciertos puntos no se captaron adecuadamente sobre la superficie de la esfera, por lo que a la hora de obtener mediante software, el radio y centro de la esfera, estos datos se desvirtúan por ese error cometido durante la captura de puntos.

Esta situación es de mayor gravedad en la “prueba de error de indicación del tamaño de la medición”, en la que se obtiene dicho error mediante la diferencia entre la distancia entre centros de esferas experimental respecto al valor calibrado. Por tanto, en la situación en que ambas esferas han sufrido este tipo de fallo durante la medición, ese error quedará muy desvirtuado.

Por el contrario, esta situación de fallos producidos en la etapa de medición, es contrarrestada debido a que la presente directriz “VDI/VDE 2617” llevada a cabo caracteriza un total de 585 esferas y se representan 570 errores por lo que de manera global, sirven para evaluar de una manera completa el brazo articulado de medición de coordenadas.

REDACCIÓN DE LA DIRECTRIZ “VDI/VDE 2617”.

En la directriz “VDI/VDE 2617” existen diversos puntos que pueden llevar a equívocos y tuvieron que ser analizados en profundidad puesto que son apartados que especifican las evaluaciones de datos que se realizan.

El apartado “4.2.4.1 Probing error for the sphere location” explica, para la primera prueba de evaluación que se realiza, “error de palpado de posición de la esfera”, que deben ser calculados todas las distancias posibles entre centros obtenidos para cada posición. Es decir, de los 5 centros de esfera que se han obtenido en cada posición, pueden obtenerse 10 distancias posibles por posición, un total de 30 distancias en el global de la prueba. La mayor de esa distancia, será el error que evalúa esta prueba.

Por el contrario, en este mismo apartado de la directriz “VDI/VDE 2617”, una nota explicativa final, interpreta que son obtenidas 5 distancias por posición y 15 distancias en el global de la prueba. Es decir, se encuentra aquí una incongruencia que es atribuida a que no se refiere a distancias, sino a centros de esferas, por lo que la prueba se ha realizado exactamente como explica el párrafo, obviando esta nota explicativa que ofrece dudas en su redacción.

INFORMACIÓN DEL FABRICANTE FARO.

La directriz “VDI/VDE 2617” especifica que de acuerdo a los resultados obtenidos tras la realización de la “prueba de error de indicación del tamaño de la medición”, deben presentarse los errores de indicación del tamaño de la medición, E , junto con sus valores límite, MPE_E , en un diagrama de conjunto para todas las disposiciones probadas. Dicho gráfico de valores límite, MPE_E , no es aclarado si debe realizarse de acuerdo a los resultados obtenidos en cada prueba, o debe presentarse la recta “error máximo permisible” que debería ser proporcionada por el fabricante del equipo, FARO.

Además, la directriz indica como método de verificación de la “prueba de error de indicación del tamaño de la medición”, que los errores obtenidos no deberán exceder de sus valores límite, MPE_E , que deben ser proporcionados por el fabricante.

En este caso, FARO, fabricante del equipo evaluado, no ofrece dicha recta con los valores límite, MPE_E , para este tipo de productos, sino que únicamente ofrece un valor de error para la “prueba de articulación de punto único” y “prueba de rendimiento volumétrico” de acuerdo a la norma “ASME B89.4.22-2004”. Por tanto, se opta por la opción de realizar dicha recta de valores límite, MPE_E , a partir del conjunto global de datos de la “prueba de error de indicación del tamaño de la medición”, tanto del volumen de medición completo como el volumen de medición parcial, con los datos de los 2 operarios (obviando los datos considerados espurios anteriormente mencionados).

5. DEDICACIÓN.

La dedicación para el proyecto ha sido diferente según la fecha en la que nos encontrábamos.

El proyecto comienza a partir de la primera reunión, el día 29 de septiembre de 2009, donde trazamos las líneas generales del proyecto a realizar, así como detallar las normativas y artículos que es necesario conocer.

Durante los meses de octubre a marzo, la dedicación ha sido a tiempo parcial, ya que simultáneamente, me encontraba realizando prácticas universitarias en la empresa General Motors España, S.L. Durante este periodo, se realizaron pausas debido a épocas festivas como las vacaciones de Navidad.

No obstante, durante el mes de diciembre, la dedicación es completa, ya que se realiza el trabajo de evaluación en laboratorio que requiere una gran inversión de tiempo para evaluar el brazo articulado FARO Platinum, mediante las normativas ya comentadas.

Posteriormente, durante los meses de marzo y abril, la dedicación ha sido a tiempo completo, una vez finalizadas las prácticas universitarias y debido a la proximidad de la fecha de depósito del Proyecto Final de Carrera.

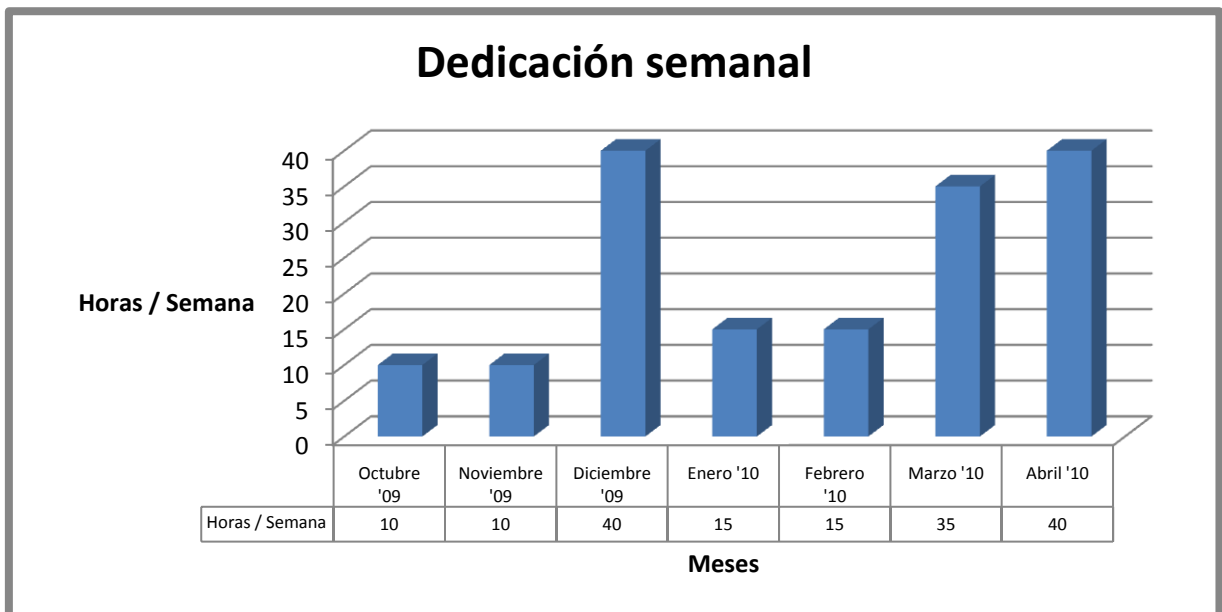


Gráfico representativo de la dedicación semanal.

6. CONOCIMIENTOS Y HABILIDADES ADQUIRIDAS.

Durante la realización de este proyecto final de carrera, se han adquirido diversos conocimientos y habilidades muy útiles para un futuro profesional.

EL aprendizaje más importante ha sido demostrar la capacidad para desarrollar de manera autónoma, un proyecto de ingeniería completo, abarcando aspectos técnicos, prácticos y económicos.

Concretamente, los conocimientos adquiridos mediante la realización del presente Proyecto Final de Carrera son aprendizajes respecto a normas y directrices metroológicas y uso de diferentes software de uso en ingeniería.

6.1. NORMATIVAS METROLÓGICAS.

El aprendizaje central adquirido durante la realización del presente Proyecto Final de Carrera, es el conocimiento de diferentes normativas metroológicas, y que se exponen a continuación:

6.1.1. ASME B89.4.22-2004.

La norma “ASME B89.4.22-2004”, es elaborada por la “American Society of Mechanical Engineers” (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos).

La ambigüedad de las especificaciones de las máquinas de medición por coordenadas de brazo articulado (AACMM) dificultan las evaluaciones comparativas de sus características. Por ello y por el creciente uso de esta clase de equipos de medida, el comité de normas ASME B89 elegido, establece una norma industrial americana aplicable a estas máquinas. En la reunión de octubre de 1994, se estableció el equipo de proyecto B89.2.22 para desarrollar esta norma.

En la medida de lo posible, esta norma se asemejará a la “ASME B89.4.1b-2001” para máquinas de medida de coordenadas convencionales. Se ha realizado también un intento para que la norma sea compatible con normas existentes y las nuevas normas internacionales.

Esta norma se refiere a la evaluación de máquinas de medición de coordenadas de brazo articulado mediante el suministro de definiciones y procedimientos de pruebas. Estos procedimientos deben permitir a los usuarios determinar si una máquina de medición de coordenadas de brazo articulado es apropiada para sus requerimientos específicos. También debe proporcionar una información precisa de comparación de máquinas de diferentes fabricantes y proporcionar una determinación de si una máquina de medición de coordenadas de brazo articulado cumple con los requisitos contractuales sin negociaciones después de que la máquina sea comprada.

La intención de esta norma es especificar los métodos más simples que pueden ser usados para una evaluación razonable. Se reconoce que una evaluación más completa puede ser apropiada para aplicaciones especiales. Estos métodos, sin embargo, se deben especificar detalladamente en la especificación de la máquina de medición de coordenadas de brazo articulado.

En síntesis, el principal objetivo de la norma “ASME B89.4.22-2004”, es clarificar el procedimiento de evaluación de máquinas de medición por coordenadas de brazo articulado (AACMMs) y facilitar las comparaciones entre máquinas. La norma “ASME B89.4.22-2004” define los métodos de prueba capaces de obtener resultados adecuados para la mayoría de de máquinas de medición por coordenadas de brazo articulado y no pretende remplazar pruebas más completas que son requeridas para aplicaciones especiales.

6.1.2. VDI/VDE 2617.

La directriz “VDI/VDE 2617”, es desarrollada por la “Verein Deutscher Ingenieure / Verband Der Elektrotechnik” (Asociación de ingenieros alemanes / Asociación de Electrotécnica).

El contenido de esta directriz ha sido desarrollado en estricta conformidad con los requerimientos y recomendaciones de la directriz “VDI 1000”.

La directriz “VDI/VDE 2617” especifica las características que sirven para describir la precisión de las máquinas de medición por coordenadas (CMMs) y describe los procedimientos para el control de estas características.

La directriz describe procedimientos para evaluar brazos articulados de medición por coordenadas por palpadores de contacto. Se puede aplicar en:

- Aceptación de pruebas que permitan verificar la conformidad de la máquina de medición por coordenadas y su palpador, con las especificaciones del fabricante.
- Pruebas de verificación adicional realizadas por el usuario para comprobaciones periódicas del brazo articulado de medición por coordenadas y su palpador.
- Comprobaciones provisionales realizadas por el usuario para la vigilancia del brazo articulado de medición por coordenadas y su palpador entre pruebas de verificación.

La prueba es aplicable a brazos articulados de medición por coordenadas que tengan al menos cuatro ejes, no contabilizando ningún eje redundante.

6.1.3. UNE-EN ISO 10360-1.

Esta norma es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN ISO 10360-1 de noviembre de 2000, que a su vez adopta íntegramente la Norma Internacional ISO 10360-1:2000.

Esta parte de la norma ISO 10360 establece un vocabulario para máquinas de medición por coordenadas (MMC), y sus ensayos de aceptación y de verificación periódica.

A pesar de estar orientada hacia máquinas de medición por coordenadas que no son de brazo articulado, ha sido útil a la hora de desarrollar la gráfica del error máximo permisible, MPE_E , durante la “prueba de error de indicación del tamaño de la medición” que especifica la directriz “VDI/VDE 2617”, ya que esta normativa especifica el tipo de gráfico que debe ser representado, así como el tipo de función lineal que se precisa junto con sus constantes. Para la prueba de error citada, se ha optado por una recta de error de la forma:

$$MPE_E = \pm(A + \frac{L}{K})$$

Donde:

- A, es una constante positiva, expresada en micrómetros y proporcionada por el fabricante.
- K, es una constante positiva adimensional proporcionada por el fabricante.
- L, es la dimensión medida, en milímetros.

6.2. SOFTWARE.

6.2.1. FARO CAM2 MEASURE.

Es el software utilizado para la comunicación entre el brazo articulado de medición por coordenadas FARO Platinum y el ordenador, desarrollado por el propio fabricante del brazo articulado. Su disponibilidad es exclusiva bajo licencia y conexión mediante un candado electrónico.

Este software, está especializado en medición e inspección de elementos y comparación CAD con piezas, donde cada parte medida se puede comparar con los archivos de diseño de ingeniería. La tecnología base que permite lograr estos resultados es un motor CAD gráfico patentado.

A pesar de las múltiples aplicaciones que dicho software ofrece, durante la operación de medida, únicamente fue utilizado como conexión entre máquina y ordenador, y para obtener esos puntos tomados para exportarlos a otro software matemático (MATLAB), con el que serán calculados todos los datos necesarios para llevar a cabo una correcta evaluación.

6.2.2. MATLAB (MATRIX LABORATORY).

MATLAB es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio.

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

Esta herramienta matemática, sirvió para el cálculo de esferas mediante la función *lssphere*, que calcula la regresión gaussiana de la esfera utilizando el método de mínimos cuadrados a partir de los puntos palpados sobre la superficie de la esfera, en coordenadas x , y , z , obteniendo de esta manera, una esfera caracterizada por un radio y un centro, a la vez que se obtuvieron otros datos como la desviación del radio de la esfera.

Adicionalmente, mediante este mismo software, se creó una función para generar un mapa de precisión de medida del brazo articulado, para la “prueba de error de indicación del tamaño de la medición” dentro del volumen de medición completo y dentro del volumen de medición parcial. De esta manera, se indica una mayor o menor precisión de medida para cada longitud, mediante una escala de colores. Los resultados de esta función se exponen en el documento “Anejos a la memoria”.

7. ASPECTOS ECONÓMICOS.

A continuación se presenta el coste económico de realización del presente proyecto de evaluación de un brazo articulado de medición por coordenadas en concordancia a la directriz “VDI/VDE 2617”.

El coste presentado contiene el valor de los equipos utilizados en el laboratorio de metrología y necesarios para llevar a cabo la evaluación indicada, así como el trabajo de uso del laboratorio junto con el precio de trabajo de un operario de laboratorio de metrología que desarrolla la evaluación.

CONCEPTO	Unidades	Precio	Subtotal
Brazo FARO Platinum 7 ejes	1	45,000 €	45,000 €
Trípode FARO para Brazo articulado.	1	4,000 €	4,000 €
Barra Patrón de esferas UNIMETRIK.	1	6,000 €	6,000 €
Soporte KOBA para Barra Patrón.	1	8,500 €	8,500 €
Ordenador	1	800 €	800 €
Hora de trabajo técnico de laboratorio	70	60 €	4,200 €
TOTAL			68,500 €

Indicar que el precio horario del técnico de laboratorio, incluye sus honorarios y el uso del laboratorio.

Por otro lado, las horas de las que consta el trabajo son estimadas en base al propio trabajo de laboratorio, el tratamiento mediante software de los datos obtenidos y la realización del informe de evaluación.

8. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.

En este apartado se describen los logros obtenidos de la realización del presente Proyecto Final de Carrera, además de las posibles ampliaciones que se podrían aplicar sobre el trabajo ya realizado, y una serie de conclusiones personales a las que se ha llegado tras la finalización del trabajo.

8.1. CONCLUSIONES DEL TRABAJO REALIZADO.

Personalmente la experiencia ha sido muy positiva en todos los aspectos, como ya se ha comentado anteriormente, se han adquirido diversos conocimientos y habilidades importantes para un futuro profesional, especialmente en el ámbito de la metrología, un campo muy importante en la industria actual, siendo además un campo con gran demanda y evolución, puesto que el mercado siempre requiere productos con precisión y existen sectores específicos en los que la perfección en la precisión, es una constante.

8.2. CONCLUSIONES PERSONALES.

Con respecto a las conclusiones personales decir que colaborar con este departamento en este proyecto me ha resultado una experiencia muy grata ya que me ha ofrecido la posibilidad de abrirme a un campo que desconocía en gran medida. Y lo que es más importante, he tenido la oportunidad de hacer que esto sea posible.

También comentar que se ha depositado en mí la responsabilidad de realizar un trabajo que puede tener aplicaciones futuras, como su exposición en revistas de investigación, debido a que las normativas estudiadas y aplicadas son recientes, y no existe por el momento, en el ámbito de la metrología, proyectos de este tipo, que pueden ayudar a una correcta evaluación de este tipo de máquinas desde unas necesidades por parte del usuario.

8.3. LÍNEAS FUTURAS.

La continuidad de este proyecto puede ser encaminada respecto a dos posibilidades: una simplificación durante la captura y análisis de datos, y una evaluación respecto al error que introduce el operario en la evaluación.

Una opción muy interesante, con una gran posibilidad de explotación comercial podría ser el desarrollo de un entorno de programación que permita de una manera automatizada, el análisis de datos. En este sentido, se automatizaría el proceso desde la captura de puntos en el laboratorio de metrología, exportando directamente esos datos, al software MATLAB, que sería programado para el cálculo de esferas. Esos datos se exportarían mediante el mismo entorno de programación a hojas de cálculo ya programadas en función de la evaluación a realizar, que mostraría de manera inmediata, con los datos obtenidos, los cálculos de errores y gráficos, especificados por las diferentes normativas.

Todo este proceso de creación de un entorno de programación, simplificaría el proceso de trabajo en gran medida, y permitiría explotar una actividad en cuanto a la realización de evaluaciones de brazos articulados de medición por coordenadas.

Por otro lado, una posibilidad para perfeccionar la evaluación de la presente directriz “VDI/VDE 2617” es realizar una aplicación metrológica de los estudios R&R (repetibilidad y reproducibilidad).

De acuerdo con el VIM (Vocabulario Internacional de Metrología) la **repetibilidad de resultados** de mediciones es la proximidad de concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas del mismo mensurando bajo las mismas condiciones de medición. La **reproducibilidad de resultados** de mediciones es la proximidad de concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas del mismo mensurando bajo condiciones de medición que cambian.

Mediante este estudio, se puede parametrizar la interferencia que el operador que interviene en cada evaluación provoca sobre el error evaluado en comparación con otro operador. De esta manera podemos conocer, cuando existen desviaciones tanto en errores calculados, como en datos de esferas calculadas, si es debida en mayor medida, a la posición de la máquina o a la interferencia del operador.

9. CONSIDERACIONES FINALES.

Con esta memoria y anejos a la memoria, se estima: quedan suficientemente detalladas las tareas y resultados que integran este proyecto.

Y para que así conste y a los efectos oportunos que procedan, se firma esta Memoria en Zaragoza, a 29 de abril de 2010.

En Zaragoza, a 29 de abril de 2010.

El ingeniero técnico industrial:

Alberto Frisa Rubio.